# ارزیابی رفتار عرشه‌ی کامپوزیتی چند سلولی فولادی تقویت شده با صفحات GFRP★

الهام علیزاده [۱]    مهدی دهستانی [۲]    بهرام نوائی‌نیا [۳]

**چکیده** طراحی عرشه‌ی پل‌ها به‌منظور حفظ مقاومت، دوام و پایایی در طول عمر مفید آن‌ها از چالش‌های فراروی مهندسان سازه به‌حساب می‌آید. برای فائق شدن بر این چالش‌ها راه‌حل‌های مختلفی ارائه گردیده است که یکی از آن‌ها استفاده از سیستم ترکیبی متشکل از مصالح متداول نظیر بتن و فولاد به‌همراه صفحات FRP می‌باشد که تحت عنوان عرشه‌های کامپوزیتی نیز شناخته می‌شود. از آن‌جایی که این عرشه‌ها نسبتاً جدید است عملکرد آن‌ها برای حالت‌های مختلف کاملاً شناخته شده نمی‌باشد. تحقیق حاضر به بررسی عرشه‌ی کامپوزیتی متشکل از هسته‌ی فولادی و صفحات GFRP اختصاص یافته است. عرشه‌ی مورد بررسی شامل لایه‌های فوقانی و تحتانی از جنس GFRP و چندین جعبه‌ی سلولی فولادی در مرکز است. با استفاده از روش اجزای محدود و تحلیل استاتیکی غیرخطی رفتار این عرشه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است در وهله‌ی اول با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه و پس از اطمینان از صحتِ مدل‌سازی عرشه‌ی کامپوزیتی، تغییر پارامترهای مختلف نظیر ابعاد هندسی، شکل هسته‌ی فولادی و خواص مکانیکی مصالح صورت پذیرفته است. نتایج نشان می‌دهد که الگوی گسیختگی عرشه‌ی مورد مطالعه به‌دلیل تسلیم هسته‌ی فولادی، نسبت به عرشه‌های ساخته شده از FRP مطلوب‌تر است و با افزایش ضخامت و تغییر هندسه‌ی هسته‌ی فولادی، می‌توان ظرفیت باربری عرشه را افزایش داد. هم‌چنین افزایش مدول الاستیسیته‌ی لایه‌ی Grid که بیشترین ضخامت را در بین لایه‌های GFRP دارد، سبب افزایش ظرفیت باربری عرشه می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی** عرشه‌ی کامپوزیتی، صفحات GFRP، هسته‌ی فولادیِ مستطیلی و ذوزنقه‌ای، روش اجزای محدود غیرخطی.

## Evaluation the Behavior of Composite Multicellular Steel Decks Strengthened by GFRP Plates

E. Ali zade    M. Dehestani    B. Navayinia

**Abstract** *Design of bridge deck with long-term strength, durability and permanence is a significant interest for engineers. One applicable solution to this challenge could be via using hybrid system consisting of conventional materials such as concrete and steel with FRP plates which is also known as composite deck. Since these deck are relatively new so their performance is not completely known. The present study is dedicated to composite deck consists of a steel core and GFRP plates. This composite sandwich bridge deck system is composed of wrapped hybrid core of GFRP grid and multiple steel box cells with upper and lower GFRP facings. The structural performance of deck was evaluated by nonlinear finite element method and numerical results have been compared with available experimental results where possible. After ensuring the validity of numerical modeling of composite deck, parametric studies such as change in geometry, steel core shape and mechanical properties of materials have been done. It was found that failure mode of the proposed hybrid deck was more favorable because of the yielding of the steel tube when compared with that of absolute GFRP decks. Increasing the thickness and changing the steel core geometry can improve the ultimate load capacity of the deck. The grid layer has the maximum thickness among the GFRP layers and therefore ultimate load capacity of the deck enhanced by increase the elastic modulus of grid layer.*

**Keywords** Composite Decks, GFRP Plates, Rectangular and Trapezoidal Steel Core, Nonlinear Finite Element Method.

---

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۲/۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۷/۰۵ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل.

(۲) نویسنده‌ی مسئول، استادیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل.

(۳) دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل.

**مقدمه**

عرشه نقش اساسی در رفتار پل‌ها ایفا می‌کند و دوام آن می‌تواند در طول زمان بر عملکرد پل تأثیر بسزایی داشته باشد. طراحی و ساخت عرشه باید به‌گونه‌ای انجام شود که هزینه‌های ساخت، نگهداری و تعمیر آن کاهش یابد. در صورت اجرای عرشه‌ها به‌صورت پیش‌ساخته، زمان احداث پل و مشکلات مربوط به اجرای آن می‌تواند تا اندازه‌ی زیادی کاهش یابد. تعداد زیادی از عرشه‌هایی که تاکنون ساخته شده‌اند، از نوع بتن مسلح بوده‌اند و به‌علت وزن و ضخامت زیاد، اجرای آن‌ها به‌صورت پیش‌ساخته امکان‌پذیر نمی‌باشد [1,2].

عرشه‌ی اگزودرمیک نمونه‌ای از عرشه‌های کامپوزیتی متشکل از پروفیل فولادی و بتن می‌باشد که در سال ۱۹۸۰ توسط نیل بتیگول مهندس مشاور پل در نیوجرسی ساخته شده است [3]. عملکرد سازه‌ای نمونه‌ی دیگری از عرشه‌های کامپوزیتیِ پروفیل فولادی و بتن نیز توسط کیم و جیانگ در سال ۲۰۰۹ به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت [4]. عرشه‌های بتنی- پروفیل فولادی، وزن و ضخامت کمتری نسبت به عرشه‌های بتن مسلح معمولی دارند، بنابراین می‌توان آن‌ها را در دهانه‌های بلندتری اجرا نمود. در این گونه عرشه‌ها بتن و فولاد به‌گونه‌ای در کنار هم قرار می‌گیرند که از ویژگی‌های هر یک از مصالح، حداکثرِ استفاده شود. علی‌رغم برتری‌های فوق نسبت به عرشه‌های بتن مسلح، مقاومت این عرشه‌ها در قبال خوردگی نسبت به برخی از عوامل محیطی پایین است و هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن‌ها بالا می‌باشد. به‌طور کلی با توجه به موقعیت قرارگیریِ عرشه‌ها در پل‌ها در صورتی که مسئله‌ی خوردگی حائز اهمیت باشد و وزن عرشه نیز بسیار پایین باشد، می‌توان از عرشه‌هایی با مقاطعی از جنس FRP (Fiber Reinforced Polymer) استفاده نمود. عرشه‌های ساخته شده از FRP علاوه بر مقاومت بالا در برابر خوردگی و وزن کم به‌صورت پیش‌ساخته نیز قابل اجرا می‌باشند که از مزیت‌های مهم آن‌ها شمرده می‌شود. به‌منظور کاهش میزان مصرف FRP، این گونه عرشه‌ها را می‌توان به‌صورت چند سلولی با مقاطع مختلف مثلثی، ذوزنقه‌ای، مربعی و غیره تولید نمود [5].

عرشه‌های کامپوزیتی در دو دهه‌ی اخیر به‌دلیل مزایای برشمرده شده، بسیار مورد توجه پژوهشگران و طراحان قرار گرفته است. گان و همکاران در سال ۲۰۰۰ عرشه‌هایی با مقاطع مختلف از جنس GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) را با استفاده از روش اجزای محدود مدل‌سازی کردند و تنش‌های حداکثر، خصوصیات کمانشی، سختیِ محلی، سختی کلی و حداکثر تغییرمکان هر یک از آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر تنش کششی در همه‌ی نمونه‌ها تقریباً یکسان است و عرشه-ی ٤ سلولی سختی کلی کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. هم‌چنین مقطع ۳ سلولیِ دارای سخت‌کننده، سختی کلی بالایی دارد و موجب کاهش تنش‌های فشاری عرشه می‌گردد [6].

ریسینگ و همکاران در سال ۲۰۰٤ عرشه‌های کامپوزیتی را با مقاطع گوناگون از جنس GFRP ساختند و جزئیاتِ اتصال عرشه‌ها به شاهتیر، نحوه‌ی عملکرد و دوام هر یک از آن‌ها را به‌صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که عرشه‌های مورد بررسی فواید و برتری‌های مورد انتظار برای عرشه‌ی GFRP نسبت به عرشه‌های بتن مسلح معمولی را تحقق بخشیدند [7].

کیم و همکاران در سال ۲۰۰٤ با استفاده از روش اجزای محدود، عرشه‌هایی را از جنس GFRP و با مقاطع مستطیلی و ذوزنقه‌ای مدل‌سازی کردند و عملکرد سازه‌ای آن‌ها را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که مقاطع ذوزنقه‌ای مقطعی بهینه برای عرشه‌های چند سلولی به‌حساب می‌آیند [8].

جیانگ و لی در سال ۲۰۰٦ مطالعات آزمایشگاهی

و میدانی روی عرشه‌هایی با مقطع مستطیلی و از جنس GFRP انجام دادند و عملکرد و ایمنی آن‌ها را ارزیابی کردند. نتایجِ حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که عرشه‌ی مورد مطالعه مقاومت و سختی مورد انتظار را به‌خوبی تأمین کرده، زمان احداث پل را نیز به مقدار زیادی کاهش داده و مشکلات اجرایی را کم کرده است [9].

برون و برمن نیز در سال ۲۰۱۰ آزمایش‌های مقامت نهایی وخستگی بر روی دو عرشه از جنس GFRP انجام دادند و نتیجه گرفتند که نمونه‌های مورد بررسی جایگزینِ مناسبی برای عرشه‌ی قوسیِ فولادی قدیمی به حساب می‌آیند [10].

جی و همکاران در سال ۲۰۱۰ مطالعات آزمایشگاهی و میدانی در زمینه‌ی عرشه‌های ساندویچی و از جنس GFRP انجام دادند و نتیجه گرفتند که عرشه‌ی مورد بررسی بار و سختیِ مورد نظر را تأمین می‌کند و زمان ساخت و نصب آن نیز بسیار کوتاه می‌باشد [11].

قیمت اولیه‌ی عرشه‌هایی که کاملاً از FRP ساخته می‌شوند، بسیار بالا است و کمانش زودهنگام جانِ این‌گونه عرشه‌ها آن‌ها را در معرضِ ناپایداری قرار می‌دهد و از نقاط ضعف آن‌ها محسوب می‌شود. FRP موجود در ناحیه‌ی فشاری آن‌ها نیز ممکن است دچار کمانشِ محلی و خردشدگی گردد. بنابراین محققان پیشنهاد می‌کنند که صفحات FRP به‌صورت ترکیب با مصالح متداول مانند بتن و فولاد به‌کار گرفته شوند. FRP در این نوع عرشه‌های کامپوزیتی علاوه بر نقش سازه‌ای و تحمل قسمتی از بار، وظیفه‌ی پوششی مناسب و مقاومت در برابر خوردگی را نیز به عهده دارد. در این عرشه‌ها با توجه به خصوصیات هر یک از مواد و با به کارگیری مناسب آن‌ها می‌توان به ترکیبی بهینه دست یافت و هزینه‌های زیاد ساخت عرشه‌های FRP را کاهش داد و در عین حال از فواید FRP در آن‌ها بهره برد.

ایده‌ی ترکیب FRP و بتن در اعضای خمشی سیستم‌های سازه‌ای اولین بار توسط هیلمن و موری در سال ۱۹۹۰ ارائه شد. آن‌ها از ترکیب مقاطع پیش‌ساخته‌ی FRP و بتن برای ساخت عرشه استفاده کردند، به گونه‌ای که وزن عرشه نسبت به عرشه‌های بتنی بیش از ۵۰ درصد کاهش یافته است [12].

باکری و ساندر در سال ۱۹۹۰ عملکرد سازه‌ای عرشه‌ی کامپوزیتی متشکل از پوسته‌ای منحنی‌شکل از FRP را که محفظه‌ی داخلی آن با بتن پر شده را به روش اجزای محدود مورد ارزیابی قرار دادند [13]. سعیدی در سال ۱۹۹٤ مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی را روی تیرهای ساخته شده از مقاطع CFRP ( Carbon Fiber Reinforced Polymer) با پوشش دال بتن مسلح را انجام داد. در نمونه‌های آزمایشگاهی از چسب اپوکسی برای اتصال بتن و CFRP استفاده شده است. ایشان نتیجه گرفتند که بهتر است علاوه بر چسب از برش‌گیرهایی برای افزایش عملکرد مرکب دال بتنی و CFRP استفاده شود [14]. دسکویک و همکاران در سال ۱۹۹۵ تیرهایی با مقطع مربعی از جنس GFRP ساختند که ناحیه‌ی فشاری آن‌ها با بتن پر شده و از یک لایه‌ی نازک CFRP در کشش استفاده شده است. برش‌گیرهایی نیز برای بهبود عملکرد مرکب بین بتن و مقطع GFRP قرار داده شده است. آزمایش‌های تجربی حاکی از عملکرد سازه‌ای بسیار مناسب و هزینه‌ی مقرون به صرفه‌ی این تیرها بوده است [15].

کیتان و عارف در سال ۲۰۰٤ تیرهایی با مقطعِ ذوزنقه‌ای از جنس GFRP ساختند و آزمایش‌های خستگی و بارگذاری استاتیکی را بر روی آن انجام دادند. در تیرهای مورد بررسی برای کاهش میزانِ FRP و هزینه‌ی ساخت از یک لایه‌ی بتن در ناحیه‌ی فشاری استفاده شده است به گونه‌ای که با استفاده از این لایه تغییرشکل‌های محلی تیر نسبت به تیرهایی که کاملاً از FRP ساخته شده‌اند، کاهش یافته است [16].

وارن و عارف در سال ۲۰۱۰ رفتار سازه‌ایِ عرشه‌هایی با مقاطع ذوزنقه‌ای را با احتساب عملکردِ مرکبِ بین عرشه و تیر مورد ارزیابی قرار دادند. طبق

نتایج حاصل از آزمایش‌های ایشان، این عرشه‌ها جایگزین مناسبی برای عرشه‌های بتن مسلح به حساب می‌آیند [17].

هی و همکاران در سال ۲۰۱۲ عملکرد عرشه‌ی کامپوزیتی متشکل از دال بتن مسلح را که در ناحیه‌ی کششی آن صفحه‌ای از جنس GFRP قرار گرفته است را به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. ایشان برای افزایش عملکرد مرکبِ اجزای تشکیل دهنده‌ی عرشه نیز از برش‌گیر استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر برش‌گیر با ماسه‌پاشی روی سطوح GFRP نیز می‌توان عملکرد مرکب اجزای عرشه و در نتیجه ظرفیت باربری آن را بهبود بخشید [18].

جی و همکاران در سال ۲۰۱۱ رفتار عرشه‌ی کامپوزیتی متشکل از هسته‌ی فولادی و صفحات FRP موجود در ناحیه‌ی کششی و فشاری را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که مود گسیختگی عرشه‌های کامپوزیتی متشکل از هسته‌ی فولادی و FRP – به‌دلیل تسلیم هسته‌ی فولادی– نسبت به عرشه‌هایی که کاملاً از FRP ساخته می‌شوند، مطلوب‌تر است. وزن عرشه‌ی کامپوزیتی به‌دلیل استفاده از FRP نسبت به عرشه‌های فولادی کمتر است و هزینه‌ی ساخت عرشه نیز به دلیل ترکیب FRP با فولاد، نسبت به عرشه‌هایی که فقط از FRP ساخته می‌شوند، حدود ۵۰ درصد کاهش یافته است [19].

همان‌طوری که پیشتر بیان شد، اکثر مطالعاتی که پیرامون عرشه‌های کامپوزیتی صورت پذیرفته است به‌صورت آزمایشگاهی می‌باشد. به‌دلیلِ هزینه‌های بالایِ مطالعاتِ آزمایشگاهی و زمان‌بر بودن آن‌ها، استفاده از روشِ اجزای محدود برای بررسیِ رفتار این نوع سازه‌ها پیشنهاد شده است تا بتوان با برآورد دقیق‌تری هزینه‌های انجام آزمایش را کاهش داد.

هدف اصلی تحقیق حاضر مدل‌سازی عددی عرشه‌ی کامپوزیتی با استفاده از روشِ اجزای محدود و مقایسه‌ی نتایجِ حاصل از مدل‌های عددی با نتایجِ آزمایشگاهیِ انجام شده توسط دیگر محققان بوده است به‌گونه‌ای که بتوان با تشخیص پارامترهای مؤثر، رفتار این نوع از عرشه‌ها را بدون انجام آزمایش‌های هزینه‌بر و به کمک روش‌های عددی برآورد نمود.

## مدل‌سازیِ عرشه‌ی کامپوزیتی

به‌منظور تحلیل عرشه‌های کامپوزیتی به روش عدديِ اجزای محدود، ابتدا مدلی از عرشه‌ی کامپوزیتی که نمونه‌ی آزمایشگاهیِ آن توسط جی و همکاران [19] اجرا و تحت بار استاتیکی مورد آزمایش قرار گرفته است تهیه می‌شود و پس از مقایسه‌ی نتایج مدل عدديِ این تحقیق و نتایج آزمایشگاهیِ مذکور و اطمینان از صحتِ مدل عددی، نتایجِ حاصل برای سایر حالات تحلیلِ عددی ارائه می‌گردد.

## نمونه‌ی آزمایشگاهیِ عرشه‌ی کامپوزیتی

سئون جی و همکاران در سال ۲۰۱۱ رفتار عرشه‌ی کامپوزیتی به طول ۳، عرض ۱ و ضخامت ۰/۱٦٤ متر را به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند [19]. برای ساختِ عرشه از ۸ قوطیِ فولادی به ابعاد ٤/٥×۱۲٥×۱۲٥ میلی‌متر که به‌طور کامل به هم جوش خورده استفاده شده است و سمباده برای تمیز کردن زنگ موجود روی سطح قوطیِ فولادی به کار گرفته شده است. پس از تمیز کردنِ سطحِ فولاد، لایه‌ی GFRP مرکزی به هسته‌ی فولادی چسبانده شده و سپس شبکه‌ی GFRP که با استفاده از الیافِ GFRP و چسب به روش دستی ساخته شده روی لایه‌ی GFRP مرکزی قرار داده شده است. لایه‌هایی از GFRP در ناحیه‌ی تحتانی و فوقانی عرشه نیز چسبانده شده‌اند [19]. شکل (۱–الف) مقطع عرضی کل عرشه و ابعاد هر یک از اجزا و (۱–ب) نمای سه بعدیِ عرشه را نشان می‌دهد.

عرشه‌ی کامپوزیتی مورد نظر مطابق آئین‌نامه‌ی

کُره [20] طراحی و بار از طریق صفحه‌ای به ابعاد ۲۳۰×۵۸۰ میلی‌متر که برابر سطح تماس چرخ کامیون طراحی DB- 24 با زمین می‌باشد، به عرشه اعمال شده است. تکیه‌گاه‌های عرشه نیز به طول ۰/۷۵ متر و به‌صورت غلتکی می‌باشند [19]. چهار عدد تغییرمکان‌سنج $D_1$، $D_2$، $D_3$ و $D_4$ و دو عدد کرنش‌سنج $B_1$ و $B_2$ در ناحیه‌ی تحتانی عرشه نصب شده که محل قرارگیری آن‌ها در شکل (۲) آمده است. کرنش‌سنج $T_1$ و $T_2$ نیز در نقطه‌ی متناظر با کرنش‌سنج $B_1$ و $B_2$ در ناحیه‌ی فوقانی عرشه نصب شده است. علاوه بر این خصوصیات اجزای تشکیل دهنده‌ی عرشه‌ی کامپوزیتی نیز مطابق جدول (۱) می‌باشد که در آن E مدول الاستیسیته، G مدول برشی و $\vartheta$ ضریب پواسون می‌باشد.

## مدل‌سازی عددی عرشه‌ی کامپوزیتی

برای بررسی عملکرد سازه‌ای عرشه به روش اجزای محدود غیرخطی، از نرم‌افزار ANSYS نسخه‌ی ۱۲.۱ استفاده شده است. المان Solid95 برای مدل‌سازی هسته‌ی فولادی، شبکه‌ی GFRP، ورق‌های GFRP مرکزی و فوقانی و المان Shell 93 برای مدل‌سازی ورق‌های GFRP تحتانی به‌کار گرفته شده است.

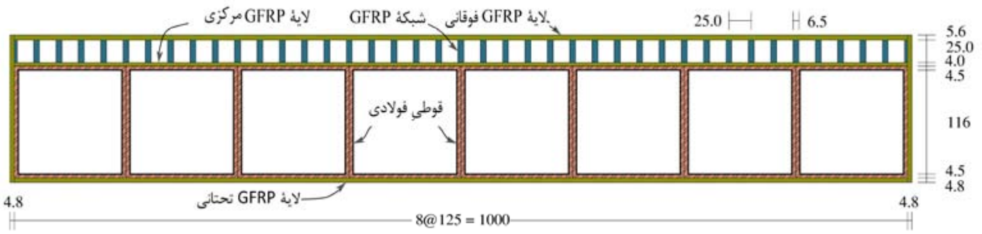
المان Solid95 با استفاده از ۲۰ گره و ۳ درجه آزادی در هر گره در راستای محورهای مختصات دکارتی تعریف شده است. با استفاده از این المان و حالت‌های مختلف آن می‌توان هندسه‌های پیچیده را با دقت مناسبی مدل‌سازی نمود. این المان توانایی لحاظ نمودن پلاستیسیته، خزش، سخت‌شدگی مجدد، در نظر گرفتن تغییرشکل‌های بزرگ و کرنش‌های بزرگ را دارد [21].

المان SHELL 281 دارای ۸ گره و ٦ درجه‌ی آزادی در هر گره شامل سه جابه‌جایی در راستای محورهای مختصات x، y و z و دوران حول آن‌ها می‌باشد. این المان برای تحلیل سازه‌های نازک تا سازه‌های نسبتاً ضخیم پوسته‌ای مناسب است و برای مدل‌سازی اجزای لایه‌ای و سازه‌های ساندویچی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [21].

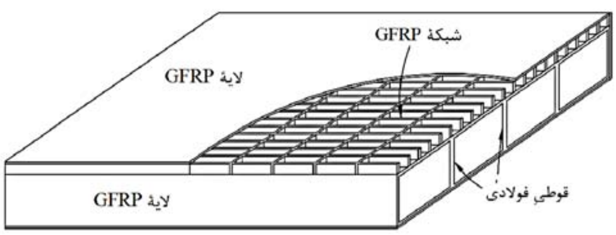
به سبب تقارن سازه و کاهش حجم محاسبات عددی از یک‌چهارم عرشه‌ی کامپوزیتی در مدل‌سازی استفاده شده است. عرشه‌ی ۸ سلولی و یک‌چهارم مدل عددی به‌همراه شرایط مرزی در شکل (۳) نشان داده شده است.

آنالیز حساسیت مطابق شکل (٤) برای مش‌بندی عرشه‌ی مورد نظر انجام شده و پس از انتخاب یک سیستم مش‌بندی مناسب از المان‌هایی به ابعاد ۰/۰۰٤٥×۰/۰٦۲٥×۰/۰۷٥ متر استفاده شده است.

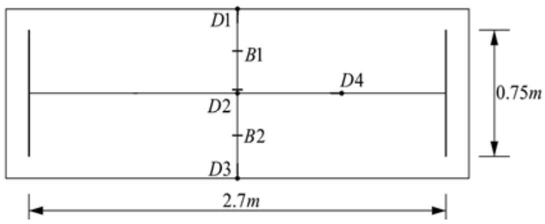
الف)




ب)



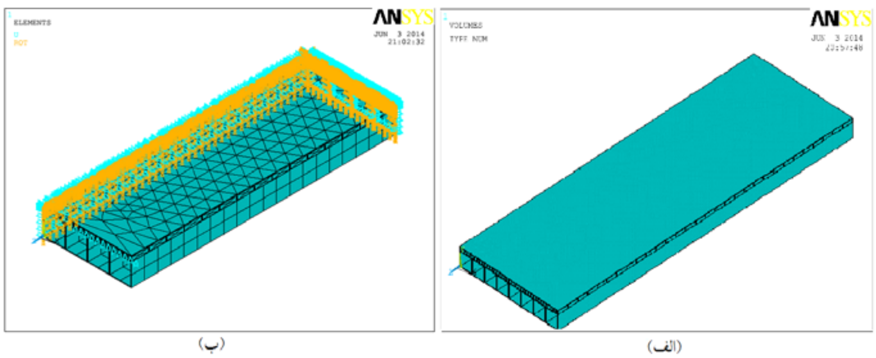

شکل ۱ اجزای تشکیل‌دهنده‌ی عرشه‌ی کامپوزیتی و ابعاد هر یک از آن‌ها (mm) [19]



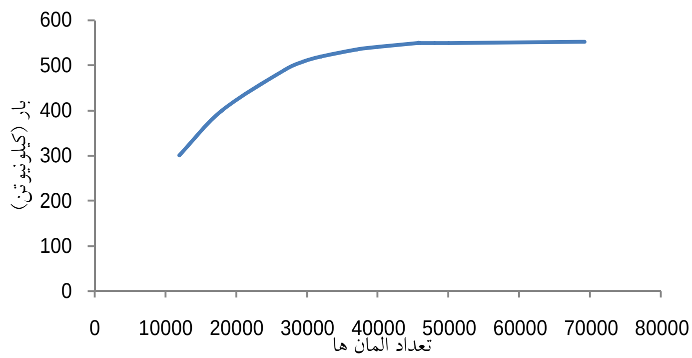

شکل ۲ نحوه‌ی قرارگیری کرنش‌سنج‌ها و تغییرمکان‌سنج‌ها در عرشه‌ی کامپوزیتی [19]

جدول ۱ مشخصات مصالح مصرفی در عرشه‌ی کامپوزیتی [19]

| مصالح | $E_1$ (GPa) | $E_2$ (GPa) | $G_{12}$ (GPa) | $\vartheta_{12}$ |
|---|---|---|---|---|
| GFRP بالایی | ۷/۹۹ | ۷/۹۹ | ۱/٦۹ | ۰/۳٤۹ |
| GFRP پایینی | ۷/۹۹ | ۷/۹۹ | ۱/٦۹ | ۰/۳٤۹ |
| GFRP مرکزی | ۱۹/۵۵ | ٤/۳۵ | ۱/۷۷ | ۰/۳٤۹ |
| شبکه‌ی GFRP | ۲۰/۳۸ | ٤/٤۲ | ۱/۸۰ | ۰/۳٤۱ |
| هسته‌ی فولادی | ۲۰٤/۰۰ | ۲۰٤/۰۰ | ۷٦/۹۰ | ۰/۳۰۰ |
| لایه‌ی چسب | ۸/۱۷ | ۸/۱۷ | ۱/۷۳ | ۰/۳٤۳ |




شکل ۳ مدل اجزای محدود عرشه‌ی ۸ سلولی، الف) کل مدل، ب) یک‌چهارم مدل



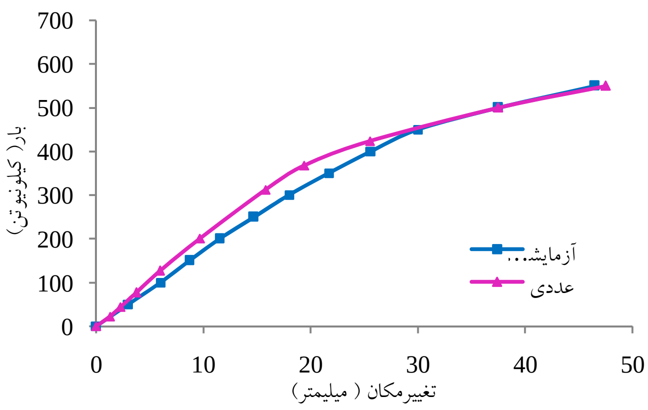

شکل ٤ آنالیز حساسیت

## مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و تحلیل عددی

طبق آئین‌نامه‌ی کُره بیشترین تغییرمکانِ مجاز برای عرشه‌های FRP، L/425 در نظر گرفته می‌شود که در آن L فاصله‌ی مرکز تا مرکز شاه‌تیر است. فاصله‌ی بین شاه‌تیرها در عرشه‌ی مورد بررسی ۲/۷ متر می‌باشد. بار کامیون DB-24، ۴۲۳/۳۲ کیلونیوتن است و بار چرخ با اعمالِ ضریب ضربه نیز ۱۲۲/۳ کیلونیوتن در نظر گرفته می‌شود [19]. نتایج آزمایشگاهی مرجع [19] و عددی تحقیق حاضر برای تغییرمکانِ وسط دهانه‌ی تحت بار سرویس در جدول (۲) ارائه شده است. مطابق جدول (۲) مقادیر تغییرمکان‌های وسط دهانه‌ی عرشه‌ی تحت بار سرویس در روش آزمایشگاهی و عددی از حد نهایی تغییرمکان کمتر است. هم‌چنین میزان اختلاف نتایج آزمایشگاهی و عددی ناچیز است که نشان‌دهنده‌ی دقت مدل‌سازی عددی می‌باشد. نمودار نیرو- تغییرمکان در وسطِ دهانه‌ی عرشه برای دو حالتِ آزمایشگاهی و تحلیلِ عددی در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طوری که از نمودار دیده می‌شود، سختی و ظرفیت نهایی در تحلیلِ عددی تطابق نسبتاً خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. علاوه بر این تغییرمکان و کرنش در نمونه‌ی آزمایشگاهی مطابق شکل (۲) در برخی نقاط اندازه‌گیری شده که به‌منظور مقایسه و صحت‌سنجی در روش عددی نیز در نقاط نظیر در جدول (۳) ارائه شده است. همان‌طوری که از جدول (۳) بر می‌آید نتایج آزمایشگاهیِ تغییرمکان‌سنج‌ها و کرنش‌سنجِ نصب شده روی عرشه تطابق خوبی با نتایجِ عددی دارند. گسیختگیِ نمونه‌ی آزمایشگاهی به‌دلیلِ جداشدگیِ GFRP مرکزی از هسته‌ی فولادی اتفاق افتاده است [19]. در نمونه‌ی عددی نیز روند جداشدگی ورق در محلِ GFRP مرکزی از هسته‌ی فولادی با کنترل تنش‌های موجود در لایه‌ی چسب مورد ارزیابی قرار گرفته است. تنش‌های قائم و برشیِ چسب به‌ترتیب ۵۰ و ۱۸ مگاپاسکال بوده که این مقادیر ملاک گسیختگیِ چسب می‌باشند. مود گسیختگیِ عرشه در دو حالتِ آزمایشگاهی و عددی در شکل (٦) نشان داده شده است. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود از جنبه‌های مختلفی تطابق نسبتاً خوبی بین دو مدلِ آزمایشگاهی و عددی وجود دارد، لذا می‌توان به نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی به‌کمک روش اجزای محدود در خصوصِ مدل‌سازی بتن، فولاد و FRP اطمینان نمود.

جدول ۲ تغییرمکان وسط دهانه‌ی شاهتیر تحت بار سرویس ۱۲۲/۳ کیلونیوتن

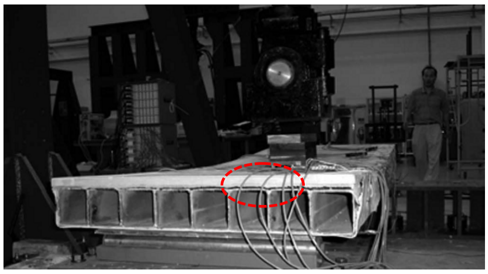
| تغییرمکان وسط دهانه (mm) | | | |
|---|---|---|---|
| اختلاف درصد آزمایشگاهی و عددی | عددی (تحقیق حاضر) | آزمایشگاهی [19] | تغییرمکان مجاز L/425 |
| ۳ | ٥/٤٦ | ٥/٦٥ | ٦/٣٥ |

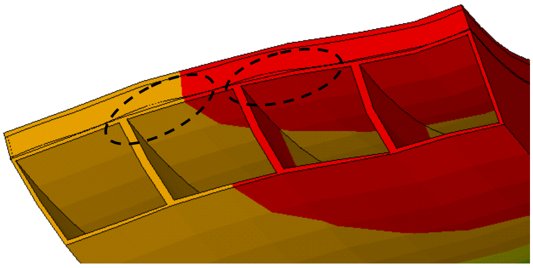



شکل ۵ نمودارنیرو- تغییرمکان وسط دهانه‌ی عرشه

جدول ۳ تغییرمکان و کرنش در بار تسلیم (۴۰۰ کیلونیوتن)

| نمونه | تغییرمکان (mm) | | | | کرنش | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $D_1$ | $D_2$ | $D_3$ | $D_4$ | $B_1$ | $T_1$ |
| آزمایشگاهی [19] | ۲۰/۷۲۰ | ۲۵/۶۶۴ | ۱۸/۸۵۸ | ۱۶/۴۲۲ | ۰/۰۰۲۹۶ | ۰/۰۰۳۳۳ |
| عددی (تحقیق حاضر) | ۱۵/۹۴۲ | ۲۲/۵۷۶ | ۱۵/۹۴۲ | ۱۵/۹۷۶ | ۰/۰۰۲۰۵ | ۰/۰۰۳۱۸ |


الف) آزمایشگاهی


ب) عددی

شکل ۶ الگوی گسیختگی عرشه، جداشدگی GFRP مرکزی از هسته‌ی فولادی در دو نمونه‌ی الف) آزمایشگاهی و ب) عددی

## مطالعات پارامتریک

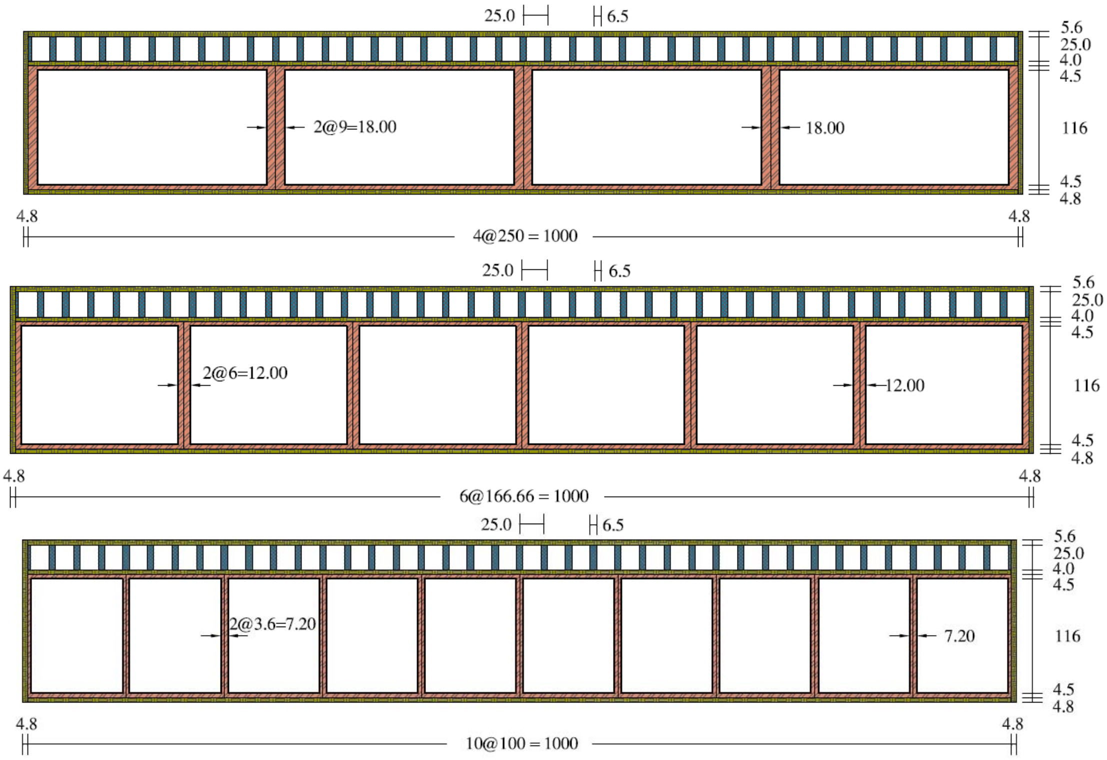
پس از اطمینان از صحت‌سنجیِ مدل‌سازیِ عددی به‌روش اجزای محدود، تحلیل‌های پارامتریک برای عرشه‌ی کامپوزیتی مورد بررسی با تغییر ابعاد، شکل هسته‌ی فولادی و خواص مکانیکی لایه‌های GFRP صورت پذیرفته است. در کلیه‌ی تحلیل‌ها نوع المان‌ها و نحوه‌ی مدل‌سازی به همان شیوه‌ای می‌باشد که در بخش صحت‌سنجی مد نظر قرار گرفته است.

## اثر تغییر ابعاد هسته‌ی فولادی

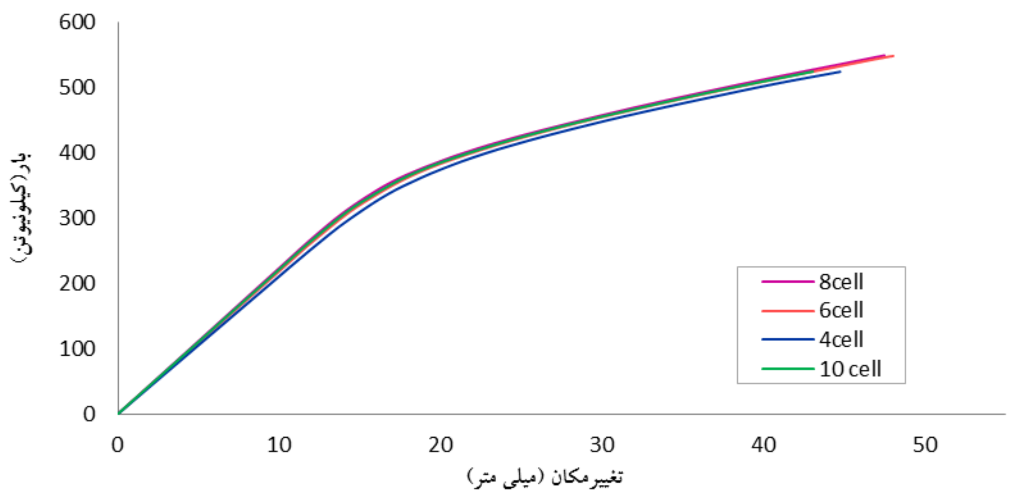
به‌منظور بررسی اثر تغییر ابعاد هسته‌ی فولادی بر رفتار عرشه‌های کامپوزیتی عرشه‌ی ۸ سلولی فولادی- FRP (شکل ۱) در نظر گرفته شده است. از آن‌جایی که هسته‌ی عرشه به‌صورتِ سلولی می‌باشد تعداد سلول‌ها و ارتفاعِ جان هسته می‌تواند از پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار سازه باشد، به همین دلیل در این بخش میزان تأثیر تعداد سلول‌ها و ارتفاعِ جان هسته‌ی فولادی بر رفتار و ظرفیت باربری عرشه مورد بررسی قرار گرفته است.

با ثابت نگه داشتن مساحت هسته‌ی فولادی در مقطعِ عرضی، تعداد سلول‌های هسته‌ی عرشه از ۸ (نمونه‌ی کنترل) به ۴، ۶ و ۱۰ تغییر داده شده است (شکل ۷) تا اثر تعداد جان‌ها، ضخامت و هم‌چنین فاصله‌ی بین آن‌ها بر ظرفیت باربری و رفتار سازه مشخص گردد. لازم به توضیح است که جنس و ضخامت بقیه‌ی لایه‌های به‌کار برده شده در عرشه‌های کامپوزیتی مدل‌سازی شده برابر با نمونه‌ی کنترل عددی در نظر گرفته شده است.

نمودارهای بار- تغییرمکان عرشه‌های ۴، ۶، ۱۰ و نمونه‌ی کنترل عددی (عرشه‌ی ۸ سلولی) در شکل (۸) آمده است. از شکل (۸) می‌توان ملاحظه نمود که تغییر در تعداد سلول‌های عرشه‌ی ۸ سلولی تأثیر چندانی بر سختی، ظرفیت باربری و شکل‌پذیریِ عرشه ندارد.



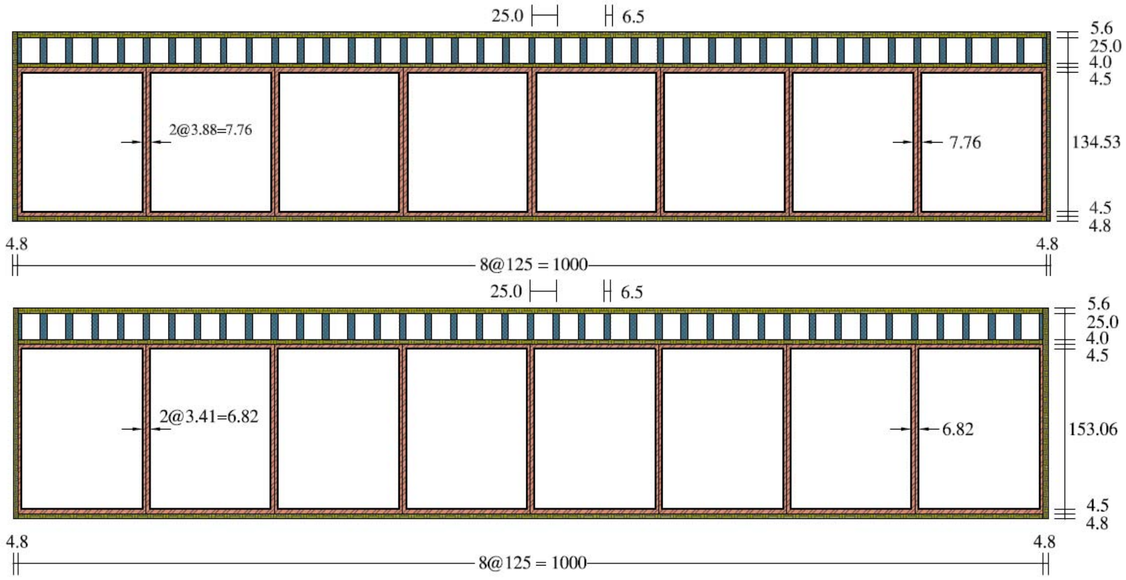

شکل ۷ عرشه‌های فولادی ٤، ٦ و۱۰ سلولی



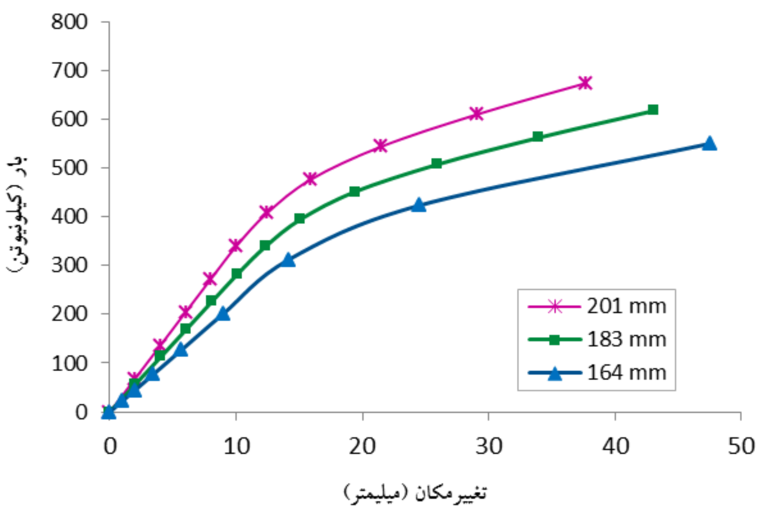

شکل ۸ بار- تغییرمکان وسط دهانه‌ی عرشه کنترل (۸ سلولی) و عرشه‌های ٤، ٦ و ۱۰ سلولی

در ادامه، با ثابت نگه داشتن مساحت هسته‌ی فولادی، ارتفاع جان عرشه‌ی ۸ سلولی (نمونه‌ی کنترل عددی) افزایش داده شده است تا اثر افزایش ضخامت عرشه‌ی کامپوزیتی بر عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گیرد. جنس و ضخامت بقیه‌ی لایه‌های به‌کار رفته در عرشه‌های کامپوزیتیِ مدل‌سازی شده، برابر با نمونه‌ی

کنترل عددی می‌باشد که دو نمونه با ضخامت ۱۸۳ و ۲۰۱ میلی‌متر در شکل (۹) نشان داده شده است. ضخامت نمونه‌ی کنترل عددی نیز ١٦٤ میلی‌متر می‌باشد. نمودارهای بار- تغییرمکانِ عرشه‌ها با ارتفاعِ متفاوت در شکل‌های (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طوری که از شکل (۱۰) بر می‌آید افزایش ارتفاع هسته‌ی فولادی باعث افزایش ظرفیت باربری عرشه می‌گردد که این میزان برای نمونه‌ای که ضخامت آن از ١٦٤ به ۲۰۱ میلیمتر رسیده ۲۲ درصد می‌باشد. افزایش ظرفیت باربری را می‌توان ناشی از بالا رفتن سختی نمونه‌ها دانست که در اثر افزایش ضخامت عرشه به‌وجود می‌آید. لازم به ذکر است که گسیختگی عرشه‌های فوق به‌دلیل جداشدگی GFRP از هسته‌ی فولادی و قبل از کمانش نهاییِ جان عرشه اتفاق افتاده است.




شکل ۹ عرشه‌های کامپوزیتی با ارتفاع۱۸۳ و ۲۰۱ میلی‌متر




شکل ۱۰ بار – تغییرمکان عرشه‌های کامپوزیتی با ارتفاع‌های ۲۰۱، ۱۸۳ و ١٦٤ میلی‌متر

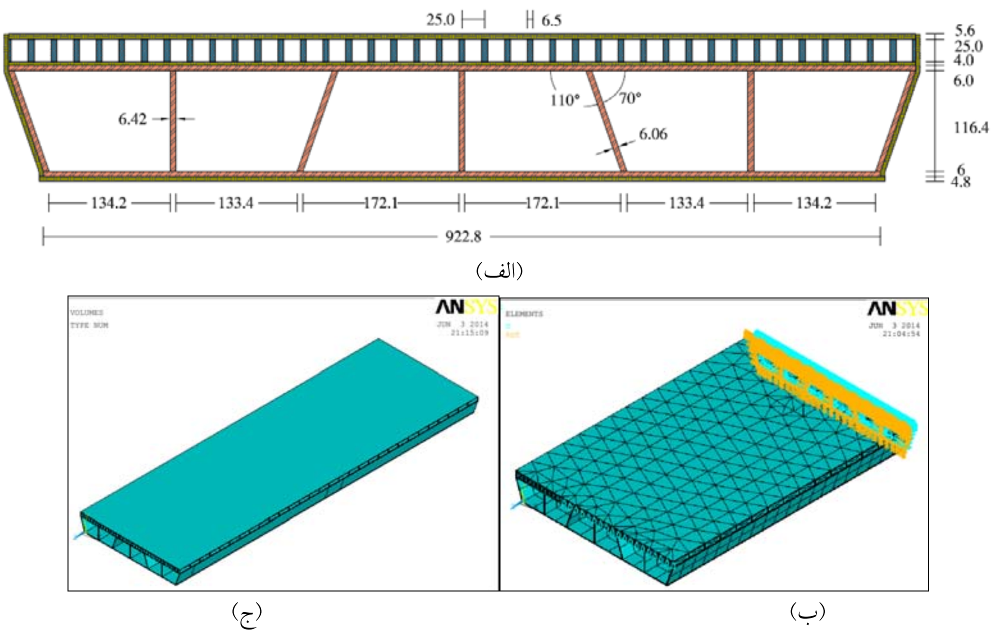
## اثر شکل هندسی مقطع هسته‌ی فولادی (مستطیلی و ذوزنقه‌ای)

از آن‌جایی که شکلِ مقطع عرشه‌ی سلولی می‌تواند یکی از عواملِ تأثیرگذار بر رفتار عرشه باشد، در این بخش تأثیر تغییرشکلِ مقطع هسته‌ی فولادی از حالت مستطیلی به ذوزنقه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد.

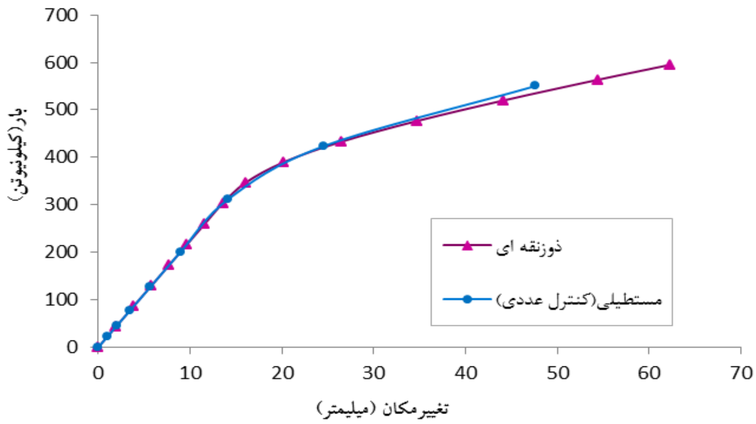
با ثابت ماندن مساحت فولاد مصرفی در هسته‌ی عرشه‌ی کامپوزیتی مستطیلی (نمونه‌ی کنترل)، شکل هسته‌ی فولادی از حالت مستطیلی به ذوزنقه‌ای تغییر داده شده است. در این مطالعه فقط شکل مقطع هسته‌ی فولادی تغییر داده شده است و سایر خصوصیاتِ هندسی و مکانیکی لایه‌های عرشه‌ی کامپوزیتی و هم‌چنین ضخامت کلِ عرشه ثابت در نظر گرفته شده‌اند. مقطع عرشه‌ی کامپوزیتی با هسته‌ی ذوزنقه‌ای و مدل عددی آن در شکل (۱۱) و نمودارهای بار-تغییرمکانِ عرشه‌ی مورد بررسی نیز در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

همانطوری که از شکل (۱۲) مشاهده می‌شود عرشه‌ی ذوزنقه‌ای ظرفیت باربری و توانایی جذب انرژی را نسبت به عرشه‌ی مستطیلی که حجم فولاد یکسانی دارند، افزایش می‌دهد ولی تأثیر چندانی در سختیِ عرشه ندارد. میزانِ افزایش ظرفیت باربری و انرژی در نمونه‌ی فوق در اثر تغییر شکلِ هسته‌ی فولادی به حالت ذوزنقه‌ای به‌ترتیب ۱۱ و ۴۷ درصد می‌باشد. با توجه به این‌که میزان و خصوصیات مکانیکیِ هر یک از مصالح مورد استفاده در عرشه‌ی ذوزنقه‌ای به‌طور کامل مشابه نمونه‌ی کنترل ۸ سلولی مستطیلی می‌باشد و با استفاده از نتایج به‌دست آمده از نمودار فوق، می‌توان نتیجه گرفت که عرشه‌ی ذوزنقه‌ای مورد بررسی رفتار نسبتاً بهتری نسبت به عرشه‌ی مستطیلی دارد.

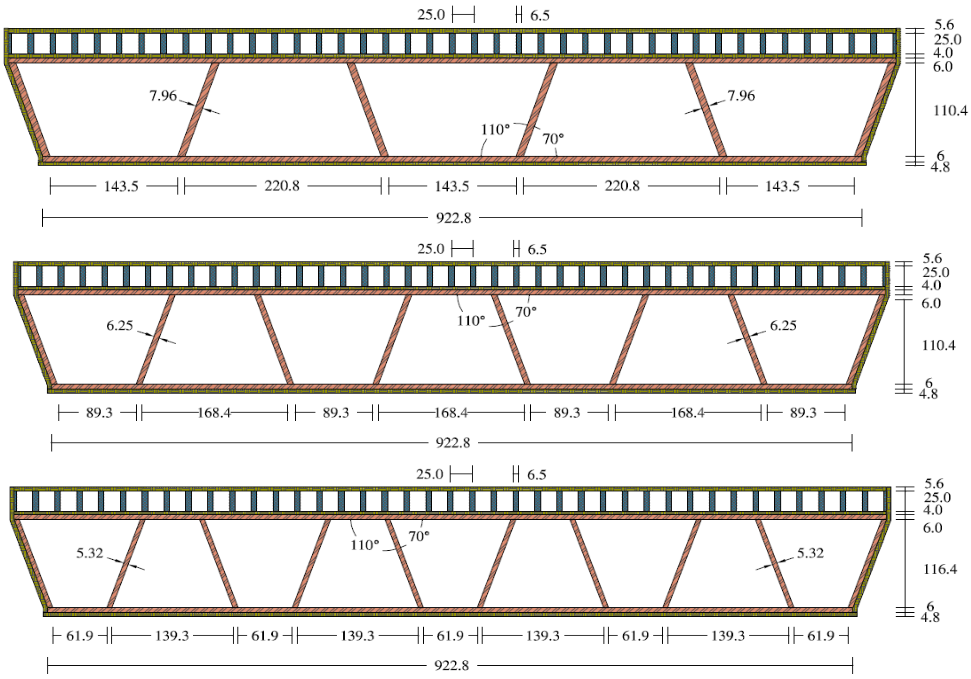
به‌منظور بررسی اثر تعداد سلول‌ها بر رفتار عرشه با ثابت نگه‌داشتنِ مساحت فولاد در مقطع عرضی معادلِ فولاد عرشه‌ی کنترل عددی و هم‌چنین ثابت نگه داشتنِ ضخامت عرشه، نمونه‌های ۵، ۷ و ۹ سلولی مدل‌سازی شده و ظرفیت باربری آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است (شکل ۱۳). نمودارهای بار-تغییرمکان نمونه‌ی فوق در شکل (۱٤) نشان داده شده است که مطابق آن، افزایش تعداد سلول‌های نمونه‌ی ذوزنقه‌ای تأثیر زیادی در سختی و شکل‌پذیری ندارد ولی ظرفیت باربری را افزایش می‌دهد. افزایش سلول‌های عرشه‌ی ذوزنقه‌ای از ۵ به ۹ ظرفیت باربری را ۱۰ درصد افزایش داده است.



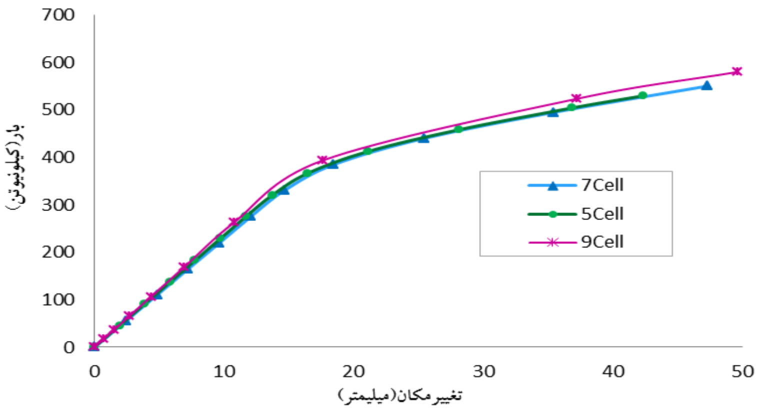

شکل ۱۱ عرشه‌ی کامپوزیتی با هسته‌ی ذوزنقه‌ای: الف) مقطع هسته، ب) کل مدل عددی، ج) نصف مدل عددی




شکل ۱۲ بار- تغییرمکان عرشه‌ی ذوزنقه‌ای و نمونه‌ی کنترل ۸ سلولی مستطیل



شکل ۱۳ عرشه‌های کامپوزیتی ۵، ۷ و ۹ سلولی با مقطع ذوزنقه‌ای

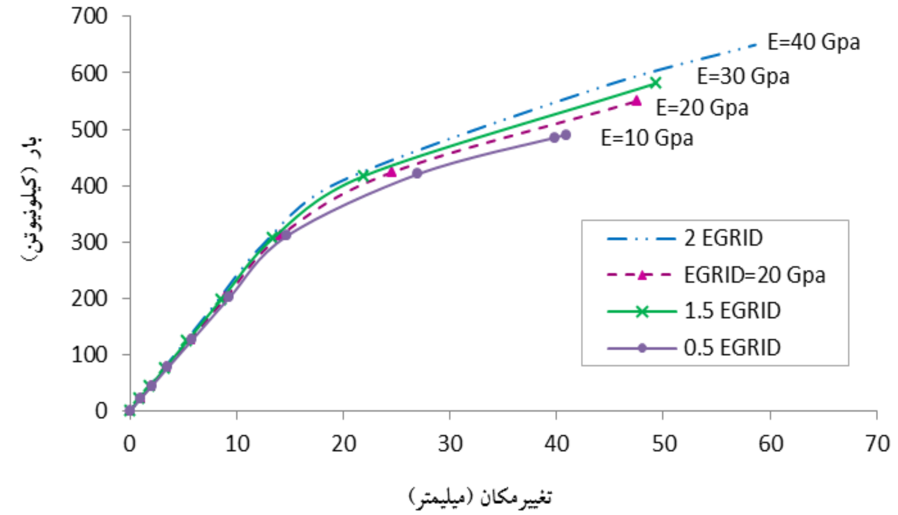



شکل ۱٤ نمودار بار- تغییر مکان عرشه‌های کامپوزیتی ذوزنقه‌ای ۵،۷ و ۹ سلولی

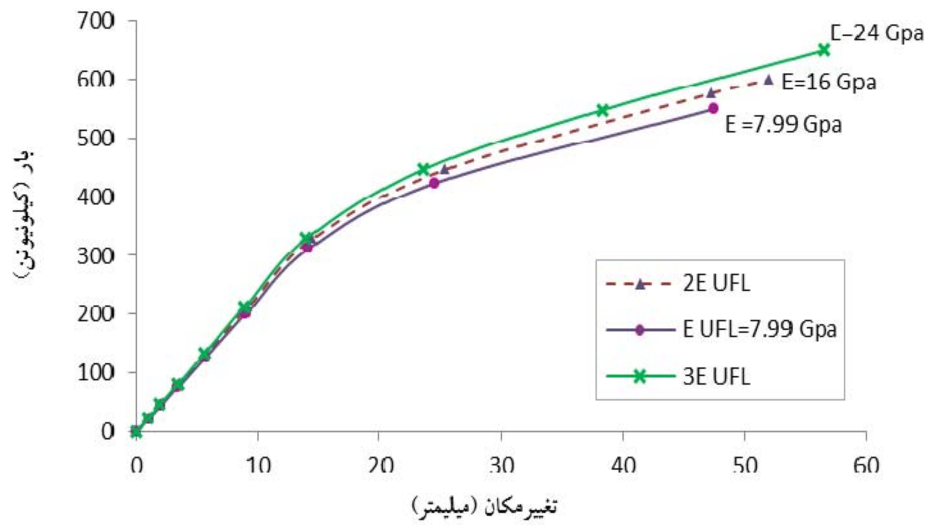
## اثر مدول الاستیسیته‌ی لایه‌های GFRP

به‌منظور بررسی اثر مدول الاستیسیته‌ی GFRP بر چهار لایه‌ی GFRP پایینی (LFL)، GFRP مرکزی (CFL)، GFRP بالایی (UFL) و شبکه‌ی GFRP (Grid) از عرشه‌ی کامپوزیتیِ مستطیلی (نمونه‌ی کنترل عددی) استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد از آن‌جایی که لایه‌ی Grid بیشترین ضخامت را در بین لایه‌های مورد بررسی دارد، تأثیر آن نیز بر ظرفیت باربری عرشه‌ی کامپوزیتی نسبت به بقیه‌ی لایه‌ها بیشتر است. افزایش مدول الاستیسیته‌ی این لایه، سبب افزایش ظرفیت باربری عرشه می‌گردد. پس از Grid، لایه‌های UFL، LFL و CFL به‌ترتیب بیشترین تأثیر را بر ظرفیت باربری نمونه‌ی کنترل عددی دارند. شکل (۱۵) نتایجِ اشاره شده‌ی فوق را با جزئیات بیشتری نشان می‌دهد.

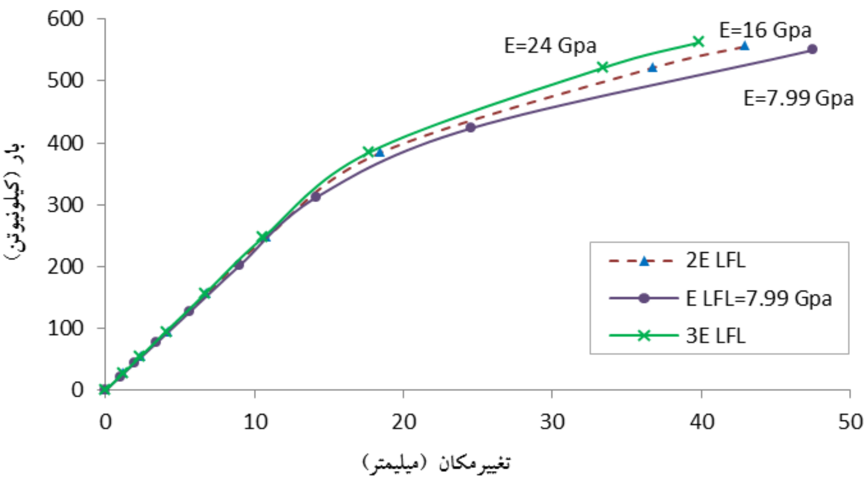
الف) Grid



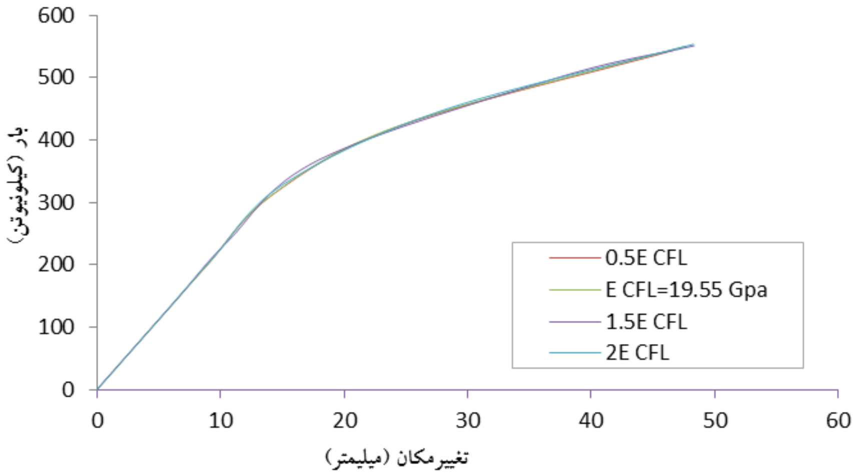

ب) UFL



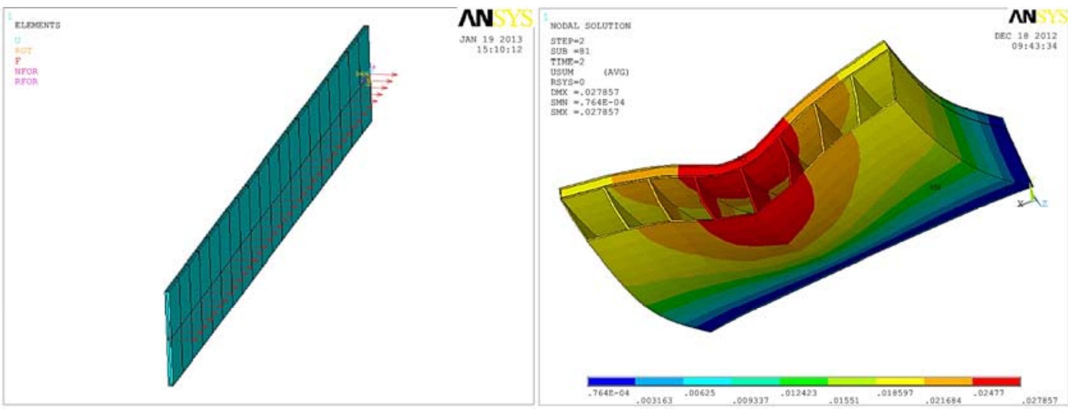

پ) LFL




ت) CFL




شکل ۱۵ نمودار تأثیر مدول الاستیسیته الف) Grid، ب)UFL، پ) LFL، ت)CFL




شکل ١٦ آنالیز کمانشی عرشه‌های کامپوزیتی

## آنالیز کمانشی عرشه‌ی کامپوزیتی

به‌منظور بررسی امکان وقوع کمانشِ جان عرشه‌ها آنالیز کمانشی بر روی تمامیِ نمونه‌هایی که مطالعه‌ی پارامتریک بر روی آن‌ها صورت پذیرفته، انجام شده است. دو روش برای انجام آنالیز کمانش در نرم‌افزار Ansys پیش‌بینی شده است. این دو روش آنالیز کمانش غیرخطی و آنالیز کمانش خطی (مقادیر ویژه) هستند. معمولاً پاسخ‌های آنالیز کمانش غیرخطی دقت بالاتری نسبت به روش خطی دارد و برای طراحی دقیق توصیه می‌شود. در روش آنالیز غیرخطی هندسی استاتیکی نرم‌افزار بار را به‌تدریج افزایش می‌دهد تا جایی که سازه به مرز ناپایداری می‌رسد. روش آنالیز کمانش خطی به مسائل خطی محدود است و براساس روش‌های حل مسائل کلاسیک الاستیک مقادیر ویژه‌ی کمانش انجام می‌شود [۲۲]. در این تحقیق از آنالیز کمانشِ غیرخطی برای انجام آنالیز کمانشی استفاده‌شده که در آن نخست بار اولیه‌ی کوچکی در راستای عمود بر صفحه‌ی جان‌ها به گره‌های موجود در خط طولیِ میانیِ جان عرشه وارد می‌شود تا راستای کمانش توسط نرم‌افزار شناخته شود سپس در مرحله‌ی دوم با حذف بار اولیه آنالیز استاتیکی غیرخطی انجام شده است (شکل ۱۶). در مطالعه‌ی پارامتریک نمودار تنش– کرنش فولاد به‌صورت الاستوپلاستیکِ دوخطی و تغییراتِ تنش– کرنش GFRP تا لحظه‌ی گسیختگی به‌صورت خطی در نظر گرفته شده است. پس از انجام مراحل فوق برای تحلیلِ غیرخطی کمانشی ملاحظه شد که در تمامیِ نمونه‌ها گسیختگیِ عرشه ناشی از کمانش جان نبوده است بلکه به‌علت جداشدگیِ GFRP مرکزی از هسته‌ی فولادی می‌باشد. با افزایش مقاومت چسب به ۲ الی ۳ برابر مقاومتِ چسبِ مورد استفاده در آزمایشگاه نیز خرابیِ نمونه‌ها به‌علت کمانشِ جان‌ها نیست بلکه به‌دلیل خردشدگیِ GFRP موجود در ناحیه‌ی فشاری بوده است.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق رفتار عرشه‌های کامپوزیتی با تغییرِ پارامترهای مختلفِ تأثیرگذار به روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت و نتایجِ زیر حاصل گردید:

۱- مقایسه‌ی نتایجِ عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مدل‌سازی عددیِ رفتار عرشه‌های کامپوزیتی به روش اجزای محدود از دقت مناسبی برخوردار است.

۲- تغییر در تعداد سلول‌های عرشه‌ی ۸ سلولی تأثیر زیادی در سختی و شکل‌پذیری عرشه ندارد.

۳- افزایش ارتفاع هسته‌ی فولادی تا جایی که باعث کمانش جان هسته نگردد ظرفیت باربری عرشه‌ها را افزایش می‌دهد و باعث بهبود عملکرد آن‌ها می-گردد.

٤- تغییرشکلِ هسته‌ی فولادیِ عرشه‌ی کامپوزیتیِ هشت سلولی از حالتِ مستطیلی به ذوزنقه‌ای، سببِ افزایشِ ظرفیت باربری و جذب انرژی عرشه مس‌شود ولی تأثیر چندانی در سختی عرشه ندارد. به‌طور کلی عرشه‌ی ذوزنقه‌ای مورد بررسی، عملکرد سازه‌ای نسبتاً بهتری نسبت به عرشه‌ی مستطیلی دارد.

۵- افزایش مدول الاستیسیته‌ی لایه‌ی Grid، سبب افزایش ظرفیت باربری عرشه شده و پس از آن، UFL، LFL و CFL به‌ترتیب بیشترین تأثیر را بر ظرفیت باربری نمونه‌ی کنترل عددی دارند.

٦- گسیختگی نمونه‌های مورد بررسی به‌دلیل جداشدگیِ GFRP از هسته‌ی فولادی و قبل از کمانش نهاییِ جان عرشه اتفاق می‌افتد.

## مراجع

1. Kim. H.Y, Jeong. Y. J, "Experimental investigation on behaviour of steel–concrete composite bridge

decks with perfobond ribs", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, pp.463-471, (2006).

2. Brown. D. L, Berman. J. W, "Fatigue and Strength Evaluation of Two Glass Fiber-Reinforced Polymer Bridge Decks", *Journal of bridge engineering,* ASCE,Vol 14, pp. 493-503, (2010).
3. Versace. J, Ramirez. J, "Implementation of Full-Width Bridge Deck Panels, A Synthesis", Publication FHWA/IN/JTRP, Joint Transportation Research program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, Paper 116, (2004).
4. Kim. H.Y, Jeong. Y. J," Ultimate strength of a steel-concrete composite bridge deck slab with profiled sheeting", Engineering Structures Elsevier, (2009).
5. Ji. H. S, Son. B. J, Ma. Z, "Evaluation of Composite Sandwich Bridge Decks with Hybrid FRP-Steel Core", *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 14, No. 1, (2009).
6. Gan. L. H, Ye. L, Mai. Y. W, "Design and evaluation of various section profiles for pultruded deck panels", Composite Structures 47, Elsevier, pp.719-725, (2000).
7. Reising. R, Shahrooz. B, "Close Look at Construction Issues and Performance of Four Fiber-Reinforced Polymer Composite Bridge Decks", *Journal of Composite for Construction,* (2004).
8. Kim. H. Y, Hwang. Y. K, Park. K, "Fiber reinforced plastic deck profile for I-girder bridges", *Journal of Composite Structures 67*, pp. 411–416, (2005).
9. Jeong. J, Lee. Y. H, Park. K, "Field and laboratory performance of a rectangular shaped glass fiber reinforced polymer deck", *Journal of Composite Structures 81,* Vol 81, pp. 622–628, (2007).
10. Brown. D. L, Berman. J. W, "Fatigue and Strength Evaluation of Two Glass Fiber-Reinforced Polymer Bridge Decks", *Journal Of Bridge Engineering Asce,* (2010).
11. Ji. H. S, Song. W, Ma. Z. J, "Design, test and field application of a GFRP corrugated-core sandwich bridge", *Journal of Engineering Structures Elsevier,* Vol. 32, pp. 2814-2824, (2010).
12. Hillman, J. R., and Murray, T. M., "Innovative floor systems for steel framed buildings", International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich, Switzerland, Vol 60, pp. 672– 675, (1990).
13. Bakeri, P. A., and Sunder, S. S., "Concepts for hybrid FRP bridge deck systems" Serviceability and Durability of Construction Materials; Proc., 1st Materials Engineering Congress , ASCE, New York, 2, pp. 1006 –1015, (1990).
14. Saiidi, M., Gordaninejad, F., and Wehbe, N., "Behavior of graphite/epoxy concrete composite beams", *J. Struct. Eng,* pp. 2958 –2976, (1994).
15. Deskovic. N, Meier. U, "Innovative design of FRP combined with concrete", *Journal of Structural Engineering,* Vol. 121, No. 7, July 1995, pp. 1069-1078, (1995).
16. Kitane. Y, Aref. A. J, Lee. G, "Static and Fatigue Testing of Hybrid Fiber-Rein forced Polymer – Concrete Bridge", *Superstructure Journal of Composite for Construction,* Vol. 8, No. 2, pp. 182-190,

ASCE, (2004).

17. Warn. G. P, Aref. A. J, "Sustained-Load and Fatigue Performance of Hybrid FRP-Concrete Bridge Deck System", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 14, No. 6, December, (2010).
18. He. J, Liu. Y, Chen. A, Dai. L, "Experimental investigation of movable hybrid GFRP and concrete bridge deck", *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 26, pp. 49–64, (2012).
19. Ji. H. S, Byun. J. K, Lee. C. S, "Structural performance of composite sandwich bridge decks with hybrid GFRP–steel core", *Journal of Composite Structures 93*, Vol. 93, pp. 430–442, (2011).
20. Ministry of Construction and Transportation (MOCT), "Standards specifications for highway bridge", 2nd Ed., South Korea, (2000).
21. ANSYS 2012, ANSYS Help.

۲۲. جاهد مطلق. ح، نوبان. م، اشراقی. م،" اجزای محدود ANSYS "، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ پنجم، (۱۳۹۰).